

**ЭНЕРГЕТИКА, ТЕПЛО- И МАССООБМЕН**

УДК 539.538::621.039.542.84

В. В. СОРОКИН

**РАСЧЕТ ИЗНОСА ЧАСТИЦ В ПЛОТНОМ ВРАЩАЮЩЕМСЯ СЛОЕ  
ВНУТРИ НЕПОДВИЖНОЙ ВИХРЕВОЙ КАМЕРЫ***Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны НАН Беларуси**(Поступила в редакцию 15.10.2013)*

Внутри короткой вихревой камеры с неподвижными стенками в потоке капельной жидкости может быть создан стационарный толстый плотный вращающийся слой частиц [1–3]. Он размещается между боковой и торцевыми стенками камеры и имеет четкую внутреннюю границу. Жидкость поступает в камеру через направляющий аппарат, размещенный на боковой стенке, приобретая радиальную и окружную составляющие скорости. Далее, обтекая частицы, проходит через слой, его внутреннюю границу и покидает камеру через центральное отверстие в торцевой крышке. Радиус границы слоя может лишь незначительно превышать радиус центрального отверстия.

При пористости около 0,5 слой демонстрирует высокую устойчивость в широком диапазоне толщин: существует десятки часов без потерь частиц, нечувствителен к ориентации относительно вертикали и различным возмущениям (удары, вибрация, переменность расхода жидкости, внедрение предметов в слой), допускает догрузку или выгрузку частиц на ходу. Несмотря на то, что частицы опираются на стенки камеры и вращаются с постоянной угловой скоростью, слой в целом похож на жидкость: способен обтекать препятствия, тела в нем могут тонуть, всплывать или диффундировать.

Важным техническим аспектом использования подвижного слоя является износ частиц и стенок устройств. Наибольшая относительная скорость и нагрузка взаимодействующих элементов характерны для области направляющего аппарата и части торцевых крышек вблизи боковой стенки. В этих областях скорость слоя относительно стенки составляет 5–15 м/с, давление частиц 0,02–0,15 МПа [3], наблюдается заметный износ. Взаимодействие между частицами происходит при скорости  $v \sim 0,6$  м/с ( $l \sim \delta$ ,  $t \sim 2\pi/\Omega n$ ,  $v = \delta/t$ ), износ проявляется слабее, чем в области у стенки камеры,  $\delta$  – ширина щели,  $\Omega$  – угловая скорость слоя,  $s^{-1}$ ,  $n$  – число щелей. Трущиеся элементы изнашиваются равномерно.

Местный износ возникает вблизи технологических отверстий и неровностей внутреннего объема вихревой камеры в зонах локализации слоя (примыкание трубопроводов для загрузки и выгрузки частиц, вводы средств измерения), уступов боковой стенки (щели подачи теплоносителя, эрозионные дефекты). Эрозия развивается в основном равномерно, однако если по внешней причине возникнет локальный дефект, то по достижении им определенного большого масштаба наблюдается ускорение его роста с положительной обратной связью. Пример местного износа возле сопловой щели на боковой стенке приведен на рис. 1, а. На боковой стенке также могут образовываться канавки, как показано на рис. 1, б.

Основная пара трения – стенка аппарата и поверхность частицы. За времена порядка часов истирается около сотой доли процента материала. Износ частиц может быть скомпенсирован их

периодической перегрузкой, аппарат заменен (полностью или в части наиболее изношенных элементов). Износ частиц легко контролировать, поскольку уменьшение их размера при истирании приводит к изменению баланса объемных и поверхностных сил. В слое такие частицы всплывают к свободной поверхности или собираются возле направляющего аппарата.

Экспериментально исследовался износ частиц олова диаметром 2,5 мм в камере из полиметилметакрилата (оргстекло) диаметром 350 мм. Навеска частиц вращалась в течение 1 ч, в результате обнаружена убыль массы в размере 0,055% от первоначальной массы [1]. Энергия для поддержания движения обеспечивалась напором водопроводной воды. Температура воды 20 °С.

Вычислим теоретическую и экспериментальную величины интенсивности изнашивания и сравним их. Используем метод [4, 5]. Рассматривается пара трения олово и полиметилметакрилат. Трение считается сухим при коэффициенте 0,17, характерном для олова [5]. Механические свойства материалов взяты из справочной литературы [6–8] и приведены в табл. 1. Поскольку значения твердости и предельных напряжений у олова значительно меньше, чем у полиметилметакрилата, принимаем, что в контакте пары изнашивается олово.

Интенсивность изнашивания определяется [4] как отношение толщины слоя  $\delta_{tr}$  утраченного материала к длине  $L_{tr}$  пройденного пути:

$$I = \delta_{tr} / L_{tr} \quad (1)$$

Толщину слоя установим балансом масс, принимая износ частиц равномерным:

$$\delta_{tr} \pi d_s^2 = \Delta e \pi d_s^3 / 6, \quad (2)$$

где  $\Delta e = 5,5 \cdot 10^{-4}$  (0,055%) – относительная потеря материала в процессе износа,  $\delta_{tr} = 4,2 \cdot 10^{-4}$  мм,  $d_s$  – диаметр частицы.

Длина пройденного пути зависит от скорости вращения слоя  $\Omega R$  и затраченного времени  $t$  с учетом следующих факторов: взаимодействие частицы и стенки осуществляется в пределах площадки контакта; частицы вдали от стенки не изнашиваются; частицы, контактирующие и не контактирующие со стенкой, меняются местами;  $R$  – радиус камеры.

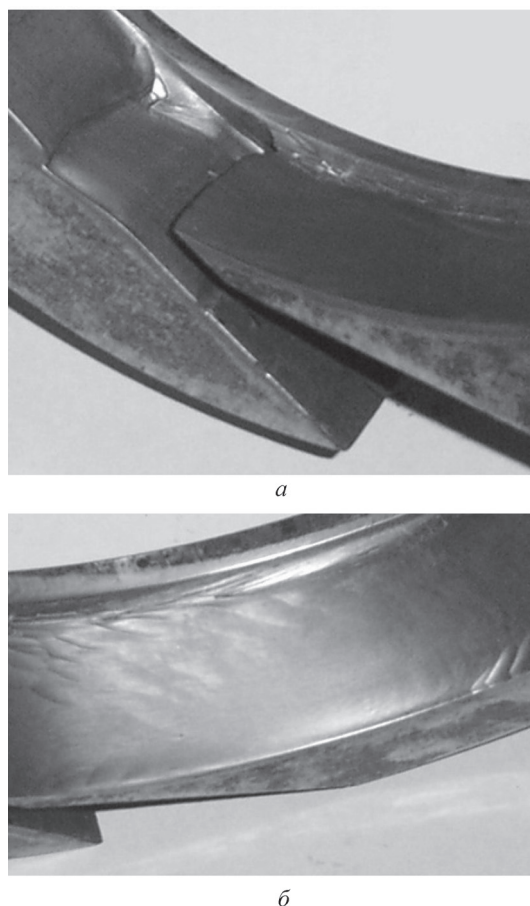


Рис. 1. Локальные эрозионные дефекты за отверстием ввода воды (а) и типа канавки на боковой стенке (б)

Таблица 1. Механические характеристики материалов

Характеристика	Полиметилметакрилат	Олово
Модуль упругости $E$ , МПа	3300	55000
Коэффициент Пуассона, $\nu_p$	0,37	0,3
Предельное напряжение при однократном растяжении $\sigma_0$ , МПа	60–90	20
Твердость по Бринеллю $HB$ , МПа	170–240	50
Напряжение текучести $\sigma_t$ , МПа	–	12

Поскольку давление слоя и трение уменьшаются с удалением от боковой стенки, то изнашиваются преимущественно частицы в контакте с боковой стенкой. Для упрощения анализа принято, что износ идет только в контакте с боковой стенкой:

$$L_{tr} = \Omega R t / M / K, \quad (3)$$

где  $M$  – число слоев частиц;  $K$  – отношение площади поверхности частицы к площади пятна контакта.

Расчет параметров слоя с исходными данными:  $D = 2R = 350$  мм; высота слоя  $h_0 = 30$  мм; радиус центрального отверстия  $R_{ц.о} = 40$  мм; давление воды в ресивере  $p_{рес} = 0,33$  МПа;  $m = 0,07$ , число щелей  $n = 36$ , высота слоя  $H_1 = 50$  мм; доля твердой фазы в слое  $\tau = 0,5$ ;  $\mu = 0,17$ ;  $\rho_{Sn} = 7,3$  г/см<sup>3</sup>;  $\rho_1 = 1$  г/см<sup>3</sup>;  $d_s = 2,5$  мм по методике [3] дает давление за слоем  $p_2 = 0,2$  МПа;  $\Omega = 61,2$  с<sup>-1</sup> (экспериментальное значение 59,5 с<sup>-1</sup>); давление слоя на боковую стенку  $P = 0,027$  МПа; скорость воды во входных отверстиях  $W_{щ} = 10,8$  м/с;  $\Omega R = 9,3$  м/с; скорость свободной границы  $W_2 = 6,3$  м/с; скорость фильтрации  $U = 0,76$  м/с.

Число частиц  $n_1$ , одновременно контактирующих с боковой стенкой, определяется выражением  $k_1 \pi D h_0 = n_1 \pi d_s^2 / 4$ , где  $k_1$  – параметр укладки, числовой коэффициент, учитывающий долю пустот между шарами. Принята величина  $k_1 = 0,846$  как среднее между значениями для треугольной (0,906) и квадратной (0,785) упаковок [1]. Тогда  $n_1 = 5690$ , а сила  $\pi D h_0 P$ , приходящаяся на площадку контакта между шаром и боковой стенкой, составит 0,157 Н. При общем числе частиц  $n_2$ , определенном выражением  $\pi D h_0 H_1 = n_2 \pi d_s^3 / 6$ ,  $n_2 = 10^5$ , число слоев составит

$$M = n_2 / n_1, \quad (4)$$

$M = 17,6$ .

Поскольку олово – металл мягкий, а нагрузка на контакт значительная, то контакт будет пластического типа. Среднее давление на контакте  $p_c$  определим равным напряжению текучести, площадь контакта  $S_k$  составит  $\pi D h_0 P / \sigma_t = 0,013$  мм<sup>2</sup>. По критерию  $p_c / HB = 0,24 > 0,0625$  контакт классифицируем как пластический насыщенный, а характеристику шероховатости  $h/r$  вычисляем по формуле  $h/r = 5,4 (HB/E)^2$  [5]. Зная площадь контакта, находим

$$K = \pi d_s^2 / S_k. \quad (5)$$

Вычисления дают  $K = 1510$ . Интенсивность изнашивания, согласно формуле (1), составит  $3,3 \cdot 10^{-7}$ , что характеризует износ, наблюдавшийся в эксперименте [1].

Для расчета теоретического значения интенсивности изнашивания  $I_T$  рекомендовано выражение [4, 5]

$$I_T = 0,2 (h/r)^{1/2} / n, \quad n = (\sigma_0 / \mu \sigma)^3. \quad (6)$$

Совпадение рассчитанной по выражению (6)  $I_T = 4,5 \cdot 10^{-7}$  и наблюдавшейся  $I = 3,3 \cdot 10^{-7}$  величин следует признать удовлетворительным, особенно при учете нетрадиционности рассматриваемой пары трения, с чем связана некоторая неопределенность коэффициентов в уравнении (6). Удовлетворительное совпадение расчетного и экспериментального значений интенсивности изнашивания подтверждает, что развитая теория плотного вращающегося слоя частиц [3] верно отражает основные причинно-следственные связи между гидродинамическими и механическими характеристиками процессов, приводит к адекватным количественным оценкам.

Для этого же устройства и массы навески частиц олова на рис. 2 приведены расчетные данные зависимости износа от нагрузки (давления в ресивере). Безразмерный износ  $\Delta$  определен как отношение убыли объема частиц при рассматриваемом давлении в ресивере к убыли их объема при давлении 0,33 МПа за 1 ч вращения. С увеличением величин нагрузки, давления частиц и скорости вращения уровень износа возрастает примерно пропорционально давлению слоя частиц на боковую стенку.

Представляет интерес вопрос о влиянии материала наружной поверхности микротвэла на уровень износа. Рассмотрим случай частиц с оболочкой из стали, движущихся в стальной каме-

ре, остальные параметры задачи прежние. Пусть механические свойства стали соответствуют параметрам стали 45.

Среднее давление на упругом контакте составит  $p_a = p_c = 0,368(N/\Theta^2 r^2)^{1/3}$  [5], где  $2r = d_s$ ;  $\Theta = 2(1-\nu_p^2)/E$ ;  $N$  – сила, прижимающая частицу к стенке. Расчеты дают  $p_c = 3,86 \cdot 10^8$  Па, площадь контакта  $N/p_c = 4 \cdot 10^{-10}$  м<sup>2</sup>,  $E = 2 \cdot 10^{11}$  Па, свойства материала приняты по [5].

Интенсивность изнашивания для приработанного контакта [4, 5] выражается формулой

$$I_T = C \alpha_T p_c \tau_0^{t/2} (E/2)^{t/2-1} (kf/\sigma_0)^t, \quad (7)$$

где  $\tau_0$  – сдвиговое напряжение,  $\tau_0 = 1,5 \cdot 10^7$  Па;  $\sigma_0$  – разрушающее напряжение при однократном растяжении,  $\sigma_0 = 7 \cdot 10^8$  Па;  $f$  – коэффициент трения,  $f = 0,13$ ; числовые коэффициенты  $C = 1,33$ ,  $\alpha_T = 0,02$ ,  $t = 7,9$ ,  $k = 3$ . Отсюда  $I_T = 6,2 \cdot 10^{-6}$ .

При числе контактов частиц с боковой стенкой 50 000 и общем количестве слоев 17,6  $L_{ir} = 38$  мм износ за 1 ч составит  $\delta_{ir} = I_T L_{ir} = 2,36 \cdot 10^{-4}$  мм, или в 9,7 раза меньше, чем для олова в тех же условиях. Таким образом, как и в классических узлах трения [4], в нашем случае повышение твердости и прочности материала пары трения приводит к возрастанию износостойкости. В этой паре целесообразно увеличивать прочность материала устройства, поскольку его замена более сложная, чем перегрузка частиц.

Наиболее тяжелые нагрузки испытывает боковая стенка. Поэтому усилению, прежде всего, подлежит именно эта деталь. Боковая стенка может быть набрана из одинаковых твердосплавных пластин с сопловыми щелями. Показано, что установка пластинок снижает уровень эрозии (рис. 3). Более экономичный вариант упрочнения включает в себя этапы эксплуатации вихревой камеры с толстым слоем до появления значительного износа; восстановление геометрии деталей твердыми и прочными материалами (например, наплавкой износостойкого сплава, как показано на рис. 4). Дальнейшая эксплуатация восстановленного изделия не приводит к заметному износу в течение длительного времени.

В паре трения из материалов, сильно отличающихся по износостойкости, преимущественно изнашивается самый слабый материал [4]. Поскольку наиболее тяжелые нагрузки испытывает боковая стенка, то выбор мягкого материала частиц значительно снизит эрозию. Выбор материала оболочки частиц существенно ограничен имеющейся технологией изготовления. Однако квазизжидкие свойства толстого слоя позволяют использовать для изоляции частицы инертного материала, имеющие большую плотность, чем частицы исходного материала. Концентрируясь у стенки, частицы инертного материала минимизируют износ. Кроме того, они могут отличаться большим диаметром.

Произведем расчет варианта толстого слоя с изолирующим слоем. Выберем устройство и слой со следующими параметрами: диаметр камеры 300 мм, центральное отверстие 80 мм, начальная высота 30 мм, число щелей 36, ширина щелей 1,8 мм (относительное проходное сечение направляющего аппарата  $m = 0,07$ ), диаметр частиц 2 мм, плотности материала шара 10 г/см<sup>3</sup>, жидкости 1 г/см<sup>3</sup>; толщина слоя 80 мм при пористости 0,49. Давление в ресивере 0,6 МПа, коэффициент трения 0,15.

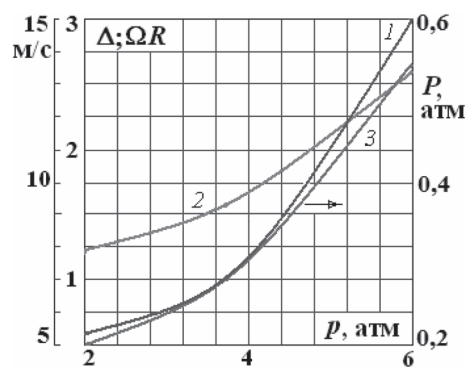


Рис. 2. Зависимость износа от нагрузки: 1 – износ; 2 – скорость вращения слоя; 3 – давление слоя частиц на боковую стенку

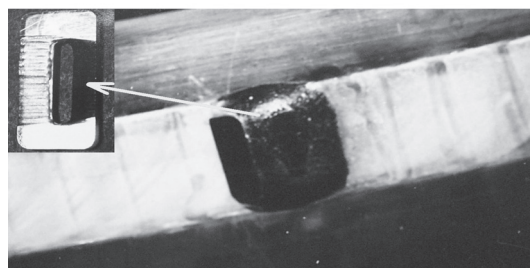
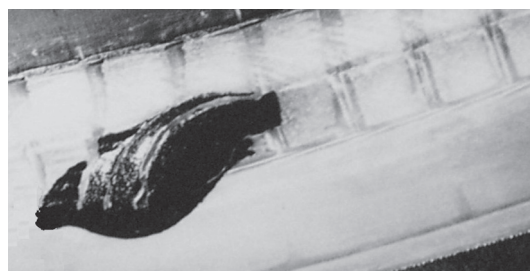


Рис. 3. Отсутствие локального эрозионного дефекта за отверстием ввода воды после установки твердосплавной пластины



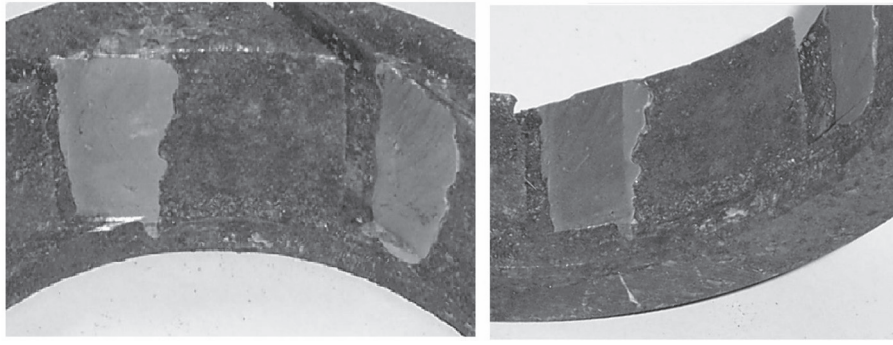


Рис. 4. Повышение износостойкости боковой стенки путем наплавки участков эрозии износостойким материалом

Рассмотрим вращающийся слой частиц плотностью  $10 \text{ г/см}^3$  у боковой стенки. Скорость радиального движения частицы можно оценить величиной  $w = n\Omega\delta/2\pi$ . По аналогии с одноатомным газом, где на молекулу приходится энергия  $E$ , а температура определяется выражением  $E = 3/2 kT$ , можно ввести температуру частицы  $E = EK = mw^2/2 = 3/2 kT$ , где масса частицы  $m = \rho Vol$ ,  $Vol$  – объем частицы. Пусть в слой попадает одна частица с плотностью  $12 \text{ г/см}^3$  и тем же объемом. По отношению к основной массе частиц она будет обладать повышенной потенциальной энергией  $EP = \Delta\rho Vol\Omega^2 Rh$ , где  $\Delta\rho$  – разница плотностей,  $h$  – расстояние до стенки. Если можно применить статистику Больцмана, то вероятность обнаружения частицы на расстоянии  $h$  от стенки пропорциональна  $\exp(-EP/kT)$ . Положив вероятность обнаружения тяжелой частицы на стенке равной единице, вычислим вероятности ее нахождения на расстоянии 2 и 4 мм, получим соответственно 0,18 и 0,03. Тяжелая частица в большинстве случаев окажется на стенке или в ее непосредственной близости. Наблюдения подтверждают этот вывод.

Фотография распределения частиц во вращающемся слое приведена на рис. 5. В засыпку частиц из олова (плотность  $7,3 \text{ г/см}^3$ ) введены в небольшом количестве частицы свинца (плотность  $11,3 \text{ г/см}^3$ ), отличающиеся большей плотностью. Наблюдается скопление тяжелых частиц у боковой стенки. Если тяжелых частиц достаточно много, то контакт между легкими частицами и стенкой может быть прекращен. Тяжелые частицы можно вводить в любой зоне слоя. По мере износа их запас можно пополнять.

Рассчитаем изменение свойств слоя при организации у боковой стенки нескольких рядов более тяжелых частиц. Данные расчета камеры с загрузкой однородных частиц плотностью  $10 \text{ г/см}^3$  сравниваются с аналогичными результатами при загрузке двух слоев частиц плотностью  $12 \text{ г/см}^3$  и остальных слоев (до полной толщины слоя) плотностью  $10 \text{ г/см}^3$  (табл. 2).

Как следует из табл. 2, наличие двух слоев более плотных частиц незначительно влияет на характеристики системы: кинематические параметры практически не меняются, давление слоя

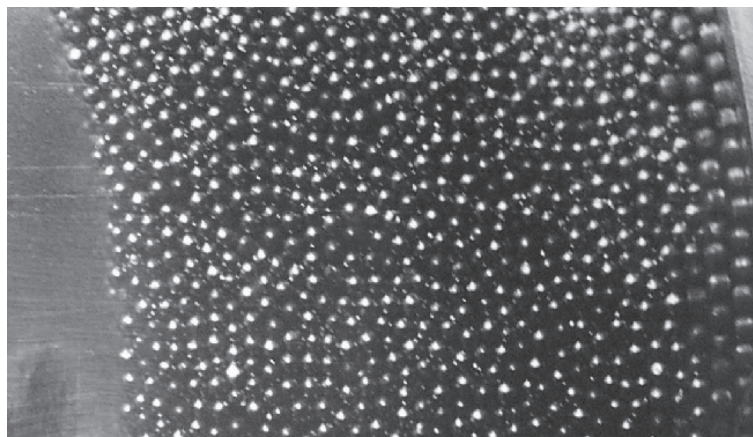


Рис. 5. Фрагмент слоя из частиц разной плотности возле боковой стенки: доли более плотных частиц достаточно для образования двух изолирующих слоев возле боковой стенки

Таблица 2. Сравнение свойств однородных и неоднородных слоев

Параметр слоя	$\Omega$ , с <sup>-1</sup>	$\Omega R$ , м/с	$W_1$ , м/с	$p_2$ , КПа	$P$ , КПа	$U$ , м/с
Загрузка однородная	91,8	13,8	16,2	160	105	1,13
Загрузка неоднородная	92,0	13,8	16,3	155	109	1,14

возрастает на 1%. При этом площадь контакта легких частиц и боковой стенки оказывается нулевой, что в соответствии с развитой моделью приведет к полному прекращению износа слоя.

Частицы в толстом вращающемся плотном слое в вихревой камере и стенки устройства изнашиваются с течением времени. Количественно износ удовлетворительно описывается на основе имеющихся инженерных методик. Наиболее подвержена износу боковая стенка камеры. С увеличением нагрузки, давления частиц и скорости вращения износ возрастает.

На основе проведенных расчетов и экспериментов показано, что интенсивность износа может быть снижена применением прочных материалов стенок и оболочек частиц (включая пластины для футеровки стенок или наплавки), использованием «жертвенного» материала. Последний представляет собой частицы, введенные в слой специально для подавления износа. Материал данных частиц отличается большей мягкостью и плотностью.

### Литература

1. Гольдитик М. А. Процессы переноса в зернистом слое. Новосибирск, 2005.
2. Сорокин В. В. // IV Конгресс физиков Беларуси. Мн., 2013. С. 35–36.
3. Сорокин В. В. // Докл. НАН Беларуси. 2009. Т.53, № 5. С. 100–103.
4. Трение, изнашивание и смазка: Справочник. В 2 кн./ Под ред. И. В. Крагельского, В. В. Алисина. М., 1978. Кн. 1.
5. Крагельский И. В., Добычин М. Н., Комбалов В. С. Основы расчетов на трение и износ. М., 1977.
6. Смирягин А. П., Смирягина Н. А., Белова А. В. Промышленные цветные металлы и сплавы. М., 1974.
7. Барацких Е. А., Шульгина Э. С. Технология пластических масс. Л., 1982.
8. Механические свойства олова [электронный ресурс]. Режим доступа: [www.shtockman.com/products/Олово\\_01пч](http://www.shtockman.com/products/Олово_01пч). Дата доступа: 12.12.2012.

V. V. SOROKIN

### PARTICLE WEAR CALCULATION IN A DENSE ROTATING BED INSIDE A STATIC VORTEX CHAMBER

#### Summary

Particle wear in a dense rotating bed inside static vortex chamber is calculated. The known engineering method is shown to be good enough for it. Lateral wall of the chamber is exposed to the most wear. Wear is proportional to pressure on lateral wall.

Wear intensity may be diminished by the use of hard materials for walls and particles or applying a special sacrificial interlayer.